



①9 BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENTAMT

⑫ Off nl gungsschrift  
⑩ DE 196 12 420 A 1

⑤1 Int. Cl. 6:  
B 22 D 11/22  
B 22 D 11/124

②1 Aktenzeichen: 196 12 420.4  
②2 Anmeldetag: 28. 3. 96  
④3 Offenlegungstag: 2. 10. 97

DE 196 12 420 A 1

⑦1 Anmelder:  
Siemens AG, 80333 München, DE

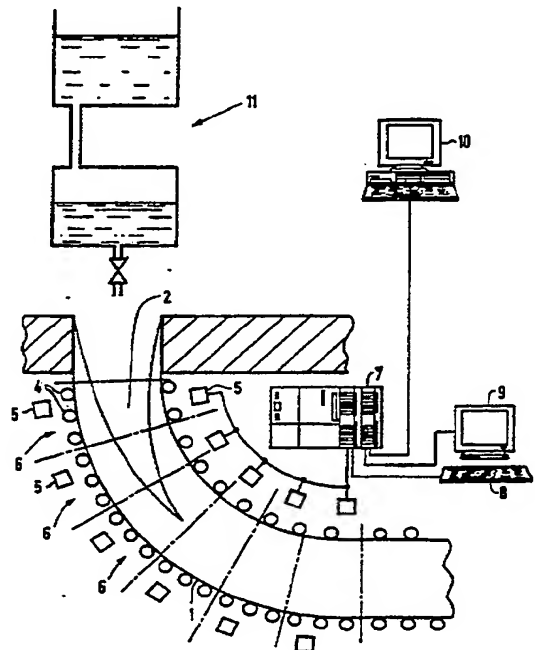
⑦2 Erfinder:  
Welker, Hans-Herbert, Dipl.-Ing., 91074  
Herzogenaurach, DE; Hartleb, Franz, Dr.-Ing., 91052  
Erlangen, DE; Gramckow, Otto, Dr.-Ing., 91052  
Erlangen, DE

⑤6 Entgegenhaltungen:  
DE 44 17 808 A1  
DE-OS 23 44 438

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

⑤4 Verfahren und Einrichtung zur Steuerung der Kühlung eines Stranges in einer Stranggießanlage

⑤7 Verfahren und Steuerung der Kühlung eines Stranges in einer Stranggießanlage, bei der die Kühlung bzw. das Erstarrungsverhalten des Stranges durch die zur Kühlung des Stranges verwendete Kühlmittelmenge erfolgt, wobei die notwendige Kühlmittelmenge in Abhängigkeit von einem vorgegebenen Solltemperaturverlauf im Strang in Echtzeit und ständig ermittelt wird. Dabei wird ein Kühlmodell verwendet, mit dem aus einer Kühlmittelmenge ein Temperaturverlauf im Strang berechnet werden kann.



DE 196 12 420 A 1

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

BUNDESDRUCKEREI 08. 97 702 040/347

7/23

## Beschreibung

Die Erfindung b trifft eine Einrichtung und in V r fahren zur Steuerung der Kühlung eines Stranges in einer Stranggießanlage.

Es ist bekannt, die Kühleinrichtungen zum Kühlen eines Stranges beim Stranggießen in Segmente aufzuteilen. Dabei wird jedem Strangsegment eine sogenannte Kühlkurve, d. h. eine Sollkühlung des Stranges in Abhängigkeit von der Stranggeschwindigkeit, zugeordnet. Durch Messung der Stranggeschwindigkeit wird auf diese Weise im Bereich eines Kühlsegments die optimale Sollkühlung des Stranges über die Kühlkurve ermittelt und die Kühlmittelmenge, z. B. die Wassermenge bei Wassersprüheinrichtungen zur Kühlung, entsprechend dieser Sollkühlung eingestellt. Auf diese Weise ist es möglich, einen Strang bei konstanter Stranggeschwindigkeit bzw. bei nur sehr langsam veränderlicher Stranggeschwindigkeit akzeptabel zu kühlen. Diese Idealbedingungen sind jedoch nicht immer gegeben. Vielmehr kann es während des Betriebes zu derart schnellen Änderungen der Stranggeschwindigkeit kommen, daß die Kühlung unter Verwendung des bekannten Verfahrens nicht mehr akzeptabel ist. Dies gilt insbesondere unter der Maßgabe, daß die Stranggeschwindigkeit stark von betrieblichen Anforderungen, wie z. B. der Zufuhr des Strangmaterials, abhängig ist.

Aufgabe der Erfindung ist es, ein Verfahren sowie eine Einrichtung zur Durchführung des Verfahrens anzugeben, das eine gegenüber dem Stand der Technik verbesserte Strangkühlung insbesondere auch bei variierender Stranggeschwindigkeit erlaubt.

Die Aufgabe wird erfindungsgemäß durch eine Einrichtung bzw. ein Verfahren zur Steuerung der Kühlung eines Stranges in einer Stranggießanlage gelöst, bei der die Kühlung bzw. das Erstarrungsverhalten des Stranges durch die zur Kühlung des Stranges verwendete Kühlmittelmenge, z. B. Wasser, sowie die Art der Kühlmittelaufbringung beeinflusst werden kann, wobei die notwendige Kühlmittelmenge bzw. Aufbringungsart in Abhängigkeit von einem vorgegebenen Solltemperaturverlauf im Strang bzw. einer äquivalenten Größe in Echtzeit und ständig ermittelt wird. Dabei ist unter Echtzeit insbesondere Rechtzeitigkeit zu verstehen sowie eine Bestimmung der notwendigen Kühlmittelmenge in kürzerer Zeit als die Zeitkonstanten der Stranggießanlage. Dabei erfolgt die Bestimmung der notwendigen Kühlmittelmenge bzw. -aufbringungsart mittels eines Kühlmodells, das die Kühlmittelmenge bzw. -aufbringungsart und den Temperaturverlauf im Strang in Beziehung setzt. Eine derartige Ausgestaltung der Erfindung ist von besonderem Vorteil, da das Kühlmodell mit der Temperatur in Abhängigkeit von der Kühlmittelmenge die Ursache Wirkung-Beziehung zwischen Kühlung und Temperatur im Strang abbildet.

In einer vorteilhaften Ausgestaltung der Erfindung erfolgt die Vorgabe eines Solltemperaturverlaufs im Strang in Form von Temperaturen an ausgewählten Punkten des Stranges, vorteilhafterweise auf der Strangoberfläche.

In einer weiteren vorteilhaften Ausgestaltung der Erfindung wird n zur Bestimmung d r notwendigen Kühlmittelmenge bzw. -aufbringungsart in Abhängigkeit vom vorgegebenen Solltemperaturverlauf im Strang die Größen Strangabmessung, Strangschalendicke, Zeit, Strangmaterial, Kristallisationswärme, Kühlmitteldruck, Tröpfchengröße des Kühlmittels und Kühltemperatur verwendet. Die Verwendung dieser Größen

ist besonders geeignet, einen besonders präzisen Wert für die notwendige Kühlmittelmenge bzw. -aufbringungsart zu erzielen.

Weitere Vorteile und erfinderische Einzelheiten ergeben sich aus der nachfolgenden Beschreibung eines Ausführungsbeispiels, anhand der Zeichnungen und in Verbindung mit den Unteransprüchen. Im einzelnen zeigen:

Fig. 1 eine Stranggießanlage

Fig. 2 ein Ablaufdiagramm zur iterativen Bestimmung einer Sollkühlmittelmenge bzw. -aufbringungsart mittels eines Kühlmodells.

Fig. 1 zeigt eine Stranggießanlage. Dabei bezeichnet Bezugszeichen 1 den gegossenen Strang, der einen erstarrten Teil 3 und einen flüssigen Sumpfteil 2 aufweist. Der Strang wird mit Antriebs- bzw. Führungsrollen 4 bewegt und auf seinem Weg durch Kühleinrichtungen 5 gekühlt. Diese sind vorteilhafterweise als Wassersprüheinrichtungen ausgebildet. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind nicht alle Antriebs- bzw. Führungsrollen 4 und Kühleinrichtungen 5 mit Bezugszeichen versehen. Beim bekannten Verfahren sind die Kühleinrichtungen 5 in Kühlsegmente 6 aufgeteilt. Diese Aufteilung ist beim neuen und erfinderischen Verfahren nicht notwendig, kann aber berücksichtigt werden. Sowohl die Antriebsrollen 4 als auch die Kühleinrichtungen sind datentechnisch mit einer Recheneinrichtung verbunden. Im vorliegenden Ausführungsbeispiel sind beide datentechnisch mit ein und derselben speicherprogrammierbaren Steuerung 7 verbunden. Die speicherprogrammierbare Steuerung 7 weist optional außerdem ein Terminal 9 und eine Tastatur 8 auf. Außerdem ist die speicherprogrammierbare Steuerung 7 mit einem übergeordneten Rechensystem 10 verbunden. Das zum Stranggießen notwendige Material, in diesem Fall flüssiger Stahl, wird über eine Zuführvorrichtung 11 zugeführt. Die Stellgrößen für die Kühleinrichtungen 5 werden mittels eines Kühlmodells, d. h. eines thermischen Modells des Stranges berechnet, das in der beispielhaften Ausgestaltung auf dem übergeordneten Rechensystem 10 implementiert ist.

Fig. 2 zeigt ein Ablaufdiagramm zur iterativen Bestimmung einer Sollkühlmittelmenge bzw. -aufbringungsart  $k_0$  mittels eines Kühlmodells 13. Dazu wird im Kühlmodell 13 aus einer gegebenen Kühlmittelmenge bzw. -aufbringungsart  $k_i$  mittels des Kühlmodells 13 ein Temperaturverlauf  $s_i$  im Strang ermittelt. Dieser Temperaturverlauf  $s_i$  wird in einem Vergleich 14 mit dem Solltemperaturverlauf  $s_0$  im Strang verglichen. Im Vergleich 14 erfolgt die Abfrage, ob  $|s_i - s_0| \leq \Delta s_{\max}$ , wobei  $\Delta s_{\max}$  ein vorgegebener Toleranzwert ist. Ist der Betrag der Differenz von  $s_i$  und  $s_0$  zu groß, so ermittelt der Funktionsblock 12 einen neuen Vorschlag  $k_i$  für eine verbesserte Kühlmittelmenge bzw. -aufbringungsart  $k_i$ . Als Anfangswert für die Iteration wird ein Wert für die Kühlmittelmenge bzw. Aufbringungsart verwendet, der sich im langzeitlichen Durchschnitt als bewährter Erfahrungswert erwiesen hat. Ist der Betrag der Differenz von  $s_i$  und  $s_0$  kleiner oder gleich dem Toleranzwert  $\Delta s_{\max}$ , so wird mit einer Sollkühlungsfestsetzung 15 die notwendige Kühlmittelmenge bzw. -aufbringungsart  $k_0$  gleich der Kühlmittelmenge bzw. -aufbringungsart  $k_i$  gesetzt. Die notwendige Kühlmittelmenge bzw. -aufbringungsart  $k_0$  stellt dabei die Stell- bzw. Führungsgröße für die Kühleinrichtung der Stranggießanlage bzw. deren Regelung dar. Die Werte  $s_i$ ,  $s_0$ ,  $\Delta s_{\max}$ ,  $k_i$ ,  $k_0$  sind nicht unbedingt Skalare, sondern Spaltenmatrizen mit ein oder mehr Werten. So enthält z. B. die Spaltenmatrix

$k_0$  die verschiedenen St II- bzw. Führungsgrößen für die Kühleinrichtungen der einzelnen Kühlsegmente einer Strangkühlanlage oder die Spaltenmatrix  $s_0$ , die Solltemperaturen an verschiedenen Stellen des Stranges.

Das Kühlmodell 13 kann sowohl als eindimensionales Modell für Brammen als auch als zweidimensionales Modell für Knüppel implementiert werden. Basis des Kühlmodells stellt, hier für den zweidimensionalen Fall dargestellt, die Wärmeüberleitungs-Gleichung

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right)$$

dar, die für das Kühlmodell 13 in Differenzform, d. h. in der Form

$$\Delta_t T = a \Delta T \left( \frac{1}{\Delta x^2} \Delta_x^2 T + \frac{1}{\Delta y^2} \Delta_y^2 T \right)$$

verwendet wird. Dabei ist  $T$  die Temperatur,  $t$  die Zeit und  $a$  die Temperaturleitfähigkeit.  $x$  und  $y$  sind die zweidimensionalen Raumkoordinaten.

Der Querschnitt der Stranghaut wird in kleine Rechtecke der Größe  $\Delta x$  mal  $\Delta y$  unterteilt und die Temperatur wird in kleinen Zeitschritten  $\Delta t$  berechnet. Als Ausgangspunkt für die Temperaturverteilung wird angenommen, daß die Temperatur beim Eintritt in die Kokille (in allen Rechtecken) die Schmelztemperatur  $T_s$  des Stahls besitzt.

Der an der Strangoberfläche abzuführende Wärmestrom  $Q$  berechnet sich aus der Oberflächentemperatur  $T_0$  des Strangs, der Umgebungstemperatur  $T_u$  der Oberfläche  $A$  und dem Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha$  mit  $Q = \alpha (T_u - T_0) A$ .

Für die Kühlung in der Kokille wird  $\alpha$  als konstant angenommen und  $T_u$  der Temperatur des Kühlwassers in der Kokille gleichgesetzt. Für die Kühlung in den Kühlzonen wird  $T_u$  der Temperatur des Spritzwassers gleichgesetzt und  $\alpha$  wird gemäß

$$\alpha = \left( 200 + 1.82 V \frac{\text{m}^2 \text{ min}}{1} \right) \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ K}}$$

berechnet, wobei  $V$  das Kühlwasservolumen in  $\frac{1}{\text{m}^2 \text{ min}}$  ist. Dabei kann  $V$  für jeden Punkt an der Strangoberfläche unterschiedlich angegeben werden, wodurch mit dem Modell auch Düsencharakteristika beschrieben werden können.

Neben dem Verlauf der Temperaturverteilung im Strang berechnet das Modell auch den Verlauf der Erstarrungsfront und damit auch den Zeitpunkt (bzw. den Abstand von der Kokille) der vollständigen Erstarrung des Strangs.

Die einzelnen Modellparameter sind u. a.:

- Kokillenlänge
- Stranggeometrie (Höhe und Breite)
- Stranggeschwindigkeit

- Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha$  in der Kokille
- Kühlwassertemperatur in der Kokille
- Schmelztemperatur
- Erstarrungsenthalpie
- Wärmeleitkoeffizient  $\lambda$
- Spezifische Wärmekapazität  $c$
- Dichte  $\rho$
- Länge jeder Kühlzone
- Kühlwasservolumen  $V$  in jeder Kühlzone

Die Temperaturabhängigkeit von  $\lambda$ ,  $c$  und  $\rho$  wird im Modell berücksichtigt.

#### Patentansprüche

1. Verfahren zur Steuerung der Kühlung eines Stranges in einer Stranggießanlage, bei der die Kühlung bzw. das Erstarrungsverhalten des Stranges durch die zur Kühlung des Stranges verwendete Kühlmittelmenge, z. B. Wasser, sowie die Art der Kühlmittelaufbringung beeinflusst werden kann, wobei die notwendige Kühlmittelmenge bzw. -aufbringungsart in Abhängigkeit von einer vorgegebenen Solltemperaturverteilung im Strang bzw. einer äquivalenten Größe in Echtzeit und ständig ermittelt wird.

2. Verfahren zur Steuerung der Kühlung eines Stranges in einer Stranggießanlage nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Bestimmung der notwendigen Kühlmittelmenge bzw. -aufbringungsart mittels eines Kühlmodells erfolgt, das die Kühlmittelmenge bzw. -aufbringungsart und die Temperaturverteilung im Strang in Beziehung setzt.

3. Verfahren zur Steuerung der Kühlung eines Stranges in einer Stranggießanlage nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß das Kühlmodell ein analytisches Modell, d. h. ein durch Differentialgleichungen bzw. Differenzgleichungen beschriebenes Modell, ist.

4. Verfahren zur Steuerung der Kühlung eines Stranges in einer Stranggießanlage nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß das Kühlmodell ein, insbesondere selbstkonfigurierendes, neuronales Netz bzw. eine Kombination von analytischem Modell und neuronalem Netz ist.

5. Verfahren zur Steuerung der Kühlung eines Stranges in einer Stranggießanlage nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, daß eine Modelladaptation an das reale Prozeßgeschehen durch on-line Lernen des neuronalen Netzes erfolgt.

6. Verfahren zur Steuerung der Kühlung eines Stranges in einer Stranggießanlage nach Anspruch 2, 3, 4 oder 5, dadurch gekennzeichnet, daß mit dem Kühlmodell die Temperaturverteilung im Strang in Abhängigkeit von der Kühlmittelmenge bzw. -aufbringungsart ermittelt wird und daß die notwendige Kühlmittelmenge bzw. -aufbringungsart auf iterative Weise in Abhängigkeit von einem vorgegebenen Solltemperaturverteilung ( $s_0$ ) bestimmt wird, wobei so oft iteriert wird, bis die Abweichung die mit dem Kühlmodell ermittelten Temperaturverteilung ( $s_i$ ) von dem vorgegebenen Solltemperaturverteilung ( $s_0$ ) kleiner ist als in vorgegebener Toleranzwert.

7. Verfahren zur Steuerung der Kühlung eines Stranges in einer Stranggießanlage nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 5, dadurch ge-

kennzeichnet, daß die Bestimmung der notwendigen Kühlmittelmenge bzw. -aufbringungsart in Abhängigkeit von einer vorgegebenen Solltemperaturverteilung im Strang mit einem, vorteilhafterweise vereinfachten, inversen Kühlmodell erfolgt.

8. Verfahren zur Steuerung der Kühlung eines Stranges in einer Stranggießanlage nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 7, dadurch gekennzeichnet, daß die Vorgabe einer Solltemperaturverteilung im Strang in Form von Temperaturen an ausgewählten Punkten des Stranges, vorteilhafterweise auf der Strangoberfläche, erfolgt.

9. Verfahren zur Steuerung der Kühlung eines Stranges in einer Stranggießanlage nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 7, dadurch gekennzeichnet, daß die Vorgabe der Solltemperaturverteilung im Strang in Form von geometrischen Abmessungen, insbesondere in Form des Sumpfsprofils, oder der Position der Sumpfspitze, erfolgt.

10. Verfahren zur Steuerung der Kühlung eines Stranges in einer Stranggießanlage nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 9, dadurch gekennzeichnet, daß zur Bestimmung der notwendigen Kühlmittelmenge bzw. -aufbringungsart in Abhängigkeit vom vorgegebenen Solltemperaturverteilung im Strang zumindest eine weitere Größe der Größen Stranggeschwindigkeit, Stranggeometrie, Strangschalendicke, Kokillenlänge, Zeit, Strangmaterial, Kühlmitteldruck bzw. -volumen, Tröpfchengröße des Kühlmittels und Kühlmitteltemperatur verwendet wird.

11. Verfahren zur Steuerung der Kühlung eines Stranges in einer Stranggießanlage nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 9, dadurch gekennzeichnet, daß zur Bestimmung der notwendigen Kühlmittelmenge bzw. -aufbringungsart in Abhängigkeit vom vorgegebenen Solltemperaturverlauf im Strang die Größen Stranggeometrie, Strangschalendicke, Zeit, Strangmaterial, Kühlmitteldruck bzw. -volumen und Kühlmitteltemperatur verwendet werden.

12. Verfahren zur Steuerung der Kühlung eines Stranges in einer Stranggießanlage nach einem oder mehreren der Ansprüche 2 bis 9, dadurch gekennzeichnet, daß die Vorgabe des Solltemperaturverlaufs über eine graphische Oberfläche, z. B. eine Windowsoberfläche, eines Rechensystems erfolgt.

13. Verfahren zur Steuerung der Kühlung eines Stranges in einer Stranggießanlage nach einem oder mehreren der Ansprüche 2 bis 12, dadurch gekennzeichnet, daß das Kühlmodell das Wärmeverhalten des Stranges moduliert.

14. Verfahren zur Steuerung der Kühlung eines Stranges in einer Stranggießanlage nach einem oder mehreren der Ansprüche 2 bis 13, dadurch gekennzeichnet, daß das Kühlmodell das thermische Verhalten des Stranges sowie des Materials in der Kokille modelliert.

15. Einrichtung zur Steuerung der Kühlung eines Stranges in einer Stranggießanlage, bei der die Kühlung bzw. das Erstarrungsverhalten des Stranges durch die zur Kühlung des Stranges verwendete Kühlmittelmenge, z. B. Wasser, sowie die Art der Kühlmittelaufbringung beeinflusst werden kann, wobei die notwendigen Kühlmittelmenge bzw. -aufbringungsart in Abhängigkeit von einem vorgegebenen Solltemperaturverteilung im Strang bzw. einer äquivalenten Größe in Echtzeit und

ständig ermittelt wird, insbesondere zur Durchführung des Verfahrens nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 14, dadurch gekennzeichnet, daß sie einen Prozeßrechner aufweist.

---

Hierzu 2 Seite(n) Zeichnungen

---

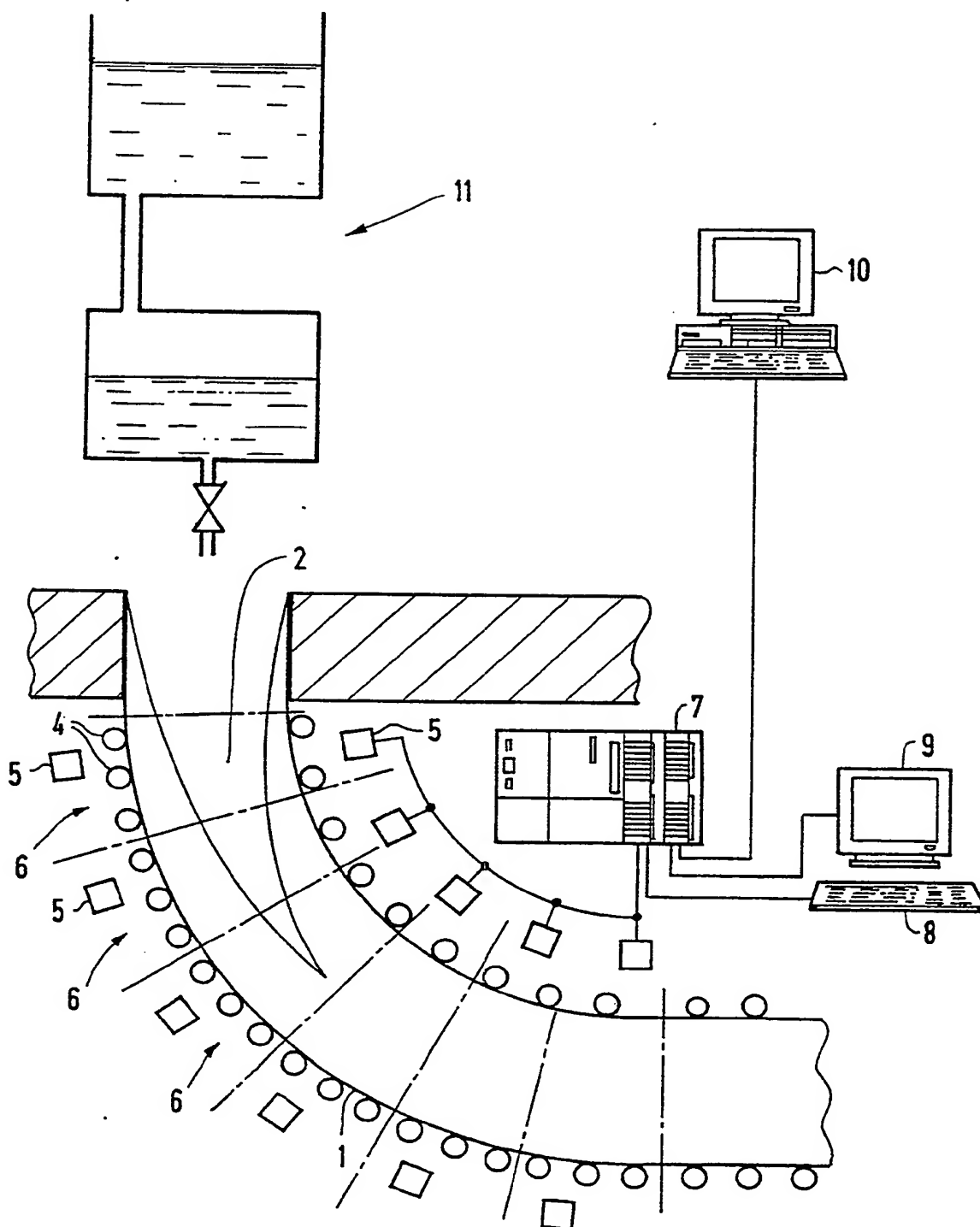


FIG 1

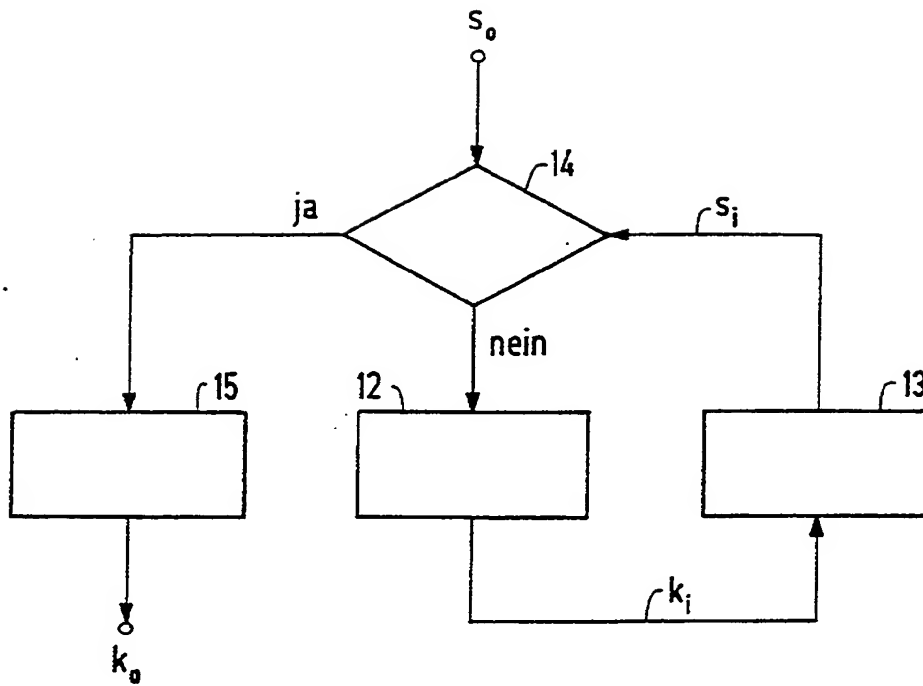


FIG 2